

온도변화를 고려한
유동기체의 방전특성에 관한 연구

김상구, 오재열, 송현직^o, 이광식, 이동인

Characteristics Of Sparkover Discharge In
Flowing Gas With Variation Of Temperature

(Sang - Ku Kim, Jae - Yel Oh, Hyun - Jig Song, Kwang - Sik Lee, Dong - In Lee)

Yeung Nam University

Abstract

This paper reports the characteristics of sparkover discharge in flowing air with variation of Temperature(T). Also, We studied changes of discharge pattern for constant input power by adjustment of the Reynolds number(Re) and T. The essentials of this paper are as follows. The invaluable equation obtained from this experiment is

$$Vs = A + B \cdot C \cdot Re$$

where A = 10.5 B = 120 C = -3.00x10⁻⁵
Breakdown Voltage for Variation of temperature in static air is given by expression

$$Vs = K (23.98 \rho d + 6.8 \sqrt{\rho d}) [kV]$$

The discharge pattern can be controlled by adjustment of the Reynolds number.

I. 서론

최근 전력계통의 고전압 및 대응량화로 인해 계통과 연계되는 차단기류 뿐만 아니라, 회전기기 등에서도 고전압 대응량화가 요구되고 있는 현시점에서 전기절연 재료로서 종전에는 液體誘電體가 많이 이용되었으나 최근에는 기체誘電體(Air, N₂, SF₆ 가스 등)가 그 절연의 우수성과 경량 등의 제특성으로 인해 絶緣材料로 많이 이용되고 있다.

이러한 電力系統의 고전압, 대응량화 함에 따라 필수적으로 수반 되는 것은 각종 전기기기의 絶緣 및 遮斷系統의 신뢰도 향상이며, 또한 이들의 정확한 특성 산정과 설계를 위해서 지금까지 연구 되어온 靜의 상태의 방전특성 뿐만 아니라, 실제의 GBB(Gas Blast circuit Breaker)와 같은 동적상태에서의 방전특성 해석에 관한 연구가 무엇보다도 중요한 것으로 인식 되어지고 있다 [1]. 따라서 본 연구는 空氣를 관로에 流動시켜 유체의 온도 변화에 따른 절연과 관련된, 전류, 방전로의 양상을 관찰하고, 이의 정량적인 분석과 이론적인 해석을 체계화 하여 방전특성을 규명 하는데 그 목적을 두고 있으며, 지금까지 많은 연구자에 의해 정지시 gas의 방전특성에 대한 해석은 많은 진전을 보아왔으나, 유동기체의 방전특성에 대한 연구는 미흡하고, 또한 연구할 과제가 많이 남아있는 실정이며, 특히 유동gas를 이용하고 있는 많은 응용분야에서는 Gas가 주위환경에 따라 온도변화 현상이 일어나므로, 그 방전 특성의 온도 의존성에 대한 연구가 절실히 요구 되고 있다.

II. 유체 이론

유동 Gas 이론은 시간에 따라서 유속이 일정한 層流領域과 변화가 심한 亂流領域이 있으며, 이들 두 영역이 共存하는 영역인 遷移領域으로 구분된다.

따라서 층류는 유체분자들이 질서정연하게 유체입자의 層과層 사이에서 운동량의 변화만 있는 흐름이고, 난류에서는 유체입자들이 아주 심한 불규칙한

운동을 교환하면서 흐르는 상태이다.

일반적으로 원통관의 흐름(pipe flow)은 다음과 같은 관계가 성립된다.(2.3.4)

$$\begin{aligned} Re < 2300 & : \text{層流} \\ 2300 < Re < 4000 & : \text{遷移領域} \\ Re > 4000 & : \text{亂流} \end{aligned}$$

여기서 Re는 Reynolds number 이다.

은활한 수평 직원통관 내에 비압축성 점성유체가 흐름 경우 관입구에서 조주거리 이후에서는 관의 전단면에 걸친 유속분포, 관마찰에 의한 압력손실의 비율 및 관단면을 지나는 유체의 운동에너지는 일정한 상태가 된다. 이와같은 경우 층류의 영역에서 연속의 식과 Navier-Stokes식을 이용하여 층류의 유속식(U)을 구하면 식(1)과 같으며, 최대유속과 평균유속과의 관계는 (2)식과 같다.

$$U = U_{max} - \frac{\Delta P}{4\mu L} r^2 \dots (1)$$

$$U_{mean} = \frac{1}{2} U_{max} \dots (2)$$

여기서

- L : 원통관과 동축인 가상유체 요소의 길이
- r : 가상유체 요소의 반경
- ΔP : L의 상하 단면 사이의 압력차
- μ : 점성계수
- U_{max} : x 방향의 최대유속
- U_{mean} : x 방향의 평균유속

난류에서는 Nikuradse의 유속분포식인 식(3)을 이용하였다. 이 식의 관마찰계수(λ)는 Re 영역에 따라 식(4), (5)인 Blasius식과 Nikuradse 식을 이용하였다 [2].

$$U = (1 + 1.326 \sqrt{\lambda}) U_{mean} - 5.75 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} U_{mean} \cdot \log_{10} \frac{r}{R - r} \dots (3)$$

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \dots (4)$$

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.25} \dots (5)$$

이상의 결과를 이용하여 Re에 따른 $\frac{U_{max}}{U_{mean}}$ 의 비는

그림1의 실선과 같이 표현되는 데 층류에서는 0.5이고 고전이영역을 지나서 난류일 때는 증가되어 0.87정도 된다. 위 결과에 의한 유속분포의 전형적인 유형은 그림1의 A), B), C)형으로 나타난다.

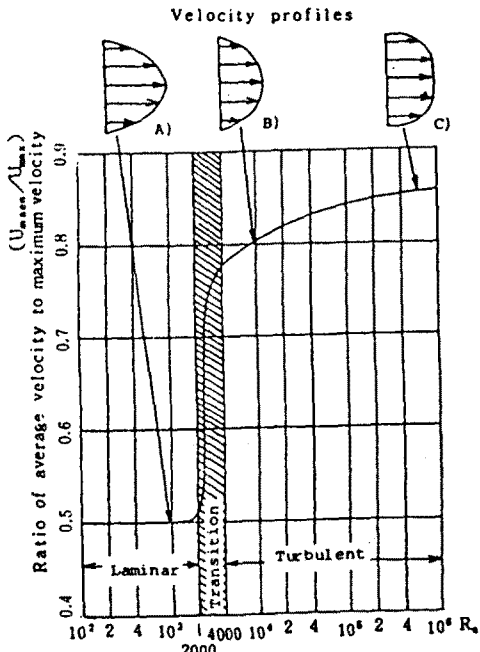


Fig.1 Ratio of average to maximum(center line) velocity versus Re for smooth pipe

여기서 Re는 다음(6)식으로 계산 하였으며, 이때 10자리수에서 반올림한 값을 Re값으로 취급 하였다.

$$Re = \frac{U_{mean} \cdot 2r_0}{\nu} \quad \dots \dots \dots (6)$$

여기서 r_0 : 관의 반경
 ν : 유체의 동점성계수

동점성계수는 온도에 따라 다음 표1과 같고, 온도변화에 따른 Reynold수는 표2와 같다.

표1. 동점성계수

온도 (°C)	30	40	60	80
$\nu (\times 10^{-5})$	1.60	1.69	1.89	2.09

표2. 온도변화에 따른 Reynold 수

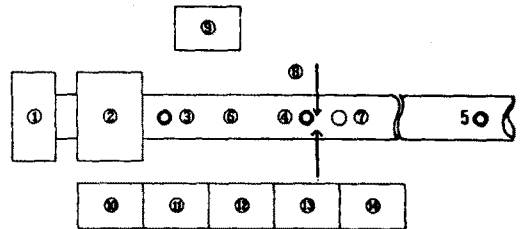
유속(m/s)	Re $\times 10^4$	온도 (°C)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
30	Re	0.60	1.25	1.87	2.50	3.12	3.75	4.37	5.00
		0.58	1.18	1.77	2.36	2.95	3.55	4.14	4.73
		0.52	1.05	1.58	2.11	2.64	3.17	3.70	4.23
		0.47	0.95	1.43	1.91	2.39	2.87	3.34	3.82

유속(m/s)	Re $\times 10^4$	온도 (°C)							
		9	10	11	12	13	14	15	16
30	Re	5.62	6.25	6.87	7.50	8.12	8.75	9.37	10.00
		5.32	5.91	6.50	7.10	7.69	8.28	8.87	9.46
		4.76	5.29	5.82	6.34	6.87	7.40	7.93	8.46
		4.30	4.78	5.26	5.74	6.22	6.69	7.17	7.65

III. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

그림2는 본실험을 위한 장치의 배치도를 나타낸 것으로서 사용된 전원은 입력전압:110[V], 60[Hz], 출력전압:DC(-)50[kV]의 Hipotronic사 제품을 이용하였다. 직원봉관의 전극 설치부는 투명 Pyrex glass (내경:5.0[cm], 외경:5.3[cm], 길이:30[cm])를 사용하여 방전로 관측에 용이 하도록 하였다. 또한 직원봉관의 총길이는 350[cm]이며, 유동공기는 실내공기 (온도:20±2[°C], 기압:757[mmHg], 습도:60[%])를 유속(0~16[m/s])과 온도(상온~80[°C])를 변화 유동시켰다. 전극은 침전극으로써 길이:10[cm], 직경:0.5[cm], 침탄부 여각:30[°]인 탄소공구강(Carbon Tool Steel 경도:215, 성분 C:1.32, Si:0.32, Mn:0.48, P:0.1, S:0.1)인 전극으로써, 상류에서 공기의 흐름과 수직이 되도록 조주거리 이후인 260[cm] 위치에 원봉관의 직경측에 수평 배치 하였으며, 기체의 온도변화를 위한 Heater(220V 10kW)에 전압제어 방식인 Thyristor unit (220V 60A)를 장착하여 그림2의 ②와 같이 상류단에 설치하였다. Herter 측구에서 255[cm] 위치에 Thermocouple[그림2의 ④]로 전극 주위의 온도를 감지 하도록 배치 하였으며, 기타 사용된 기기들은 그림과 같다.



①Blower ②Heater ③Circular duct ④Thermometer ⑤Velocity measurement hole ⑥Needle electrode ⑦DC(-) High voltage source ⑧Oscilloscope ⑨Digital kilo-voltmeter ⑩Manometer ⑪Thermal Controller

Fig2. Arrangement of experimental devices

2. 실험 방법

전극간 거리(d)를 1, 2 [cm]로 하여 각전극마다 유속을 0~16[m/s], 온도를 상온에서 80 [°C] 까지 변화 시켜가면서 온도와 유속의 변화에 따른 전도파괴전압과의 관계를 측정하였다.

전도 파괴전압은 전압을 3 [KV/S]로 상승 시켜갈 때 전도파괴가 일어나 전원이 차단 될때의 전압이며, 측정치는 5회 측정하여 산술평균 한 것이다.

또한 Reynold수가 같으면 유체 흐름장의 역학적 현상이 동일 하므로, 본 연구에서 유속은 (6)식을 이용해서 변환한 표2의 Reynold수로 재특성을 검토 하였으며, 전극은 80회 실험후 전극단부 표면용 Al₂O₃로 연마한 후 무명천으로 깨끗이 닦은 다음 실험을 하였다.

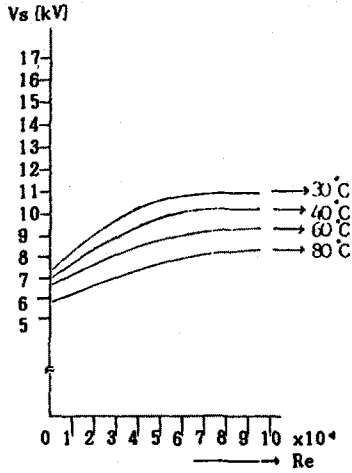
또한 d=1[cm] 이고 온도가 30[°C] 일때 전도파괴를 유지시켜 놓고 유속을 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 및 16[m/s]로 변화 시켜가면서 이때의 방전로(SDP) 및 전압, 전류 파형을 관측 하였다. 위의 과실험마다 전압, 전류 파형 및 전도파괴를 측정 및 촬영 하였으며 편의상 Re의 영역은 다음과 같이 세 영역으로 구분 하였다.

- 저 Re 영역 : 0 ≤ Re ≤ 5.62 × 10⁴
- 중 Re 영역 : 5.62 × 10⁴ ≤ Re ≤ 6.87 × 10⁴
- 고 Re 영역 : Re ≥ 6.87 × 10⁴

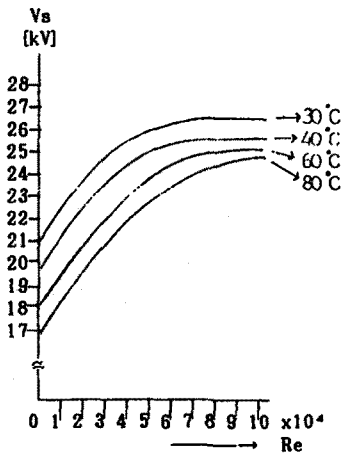
IV. 결과 및 결론

이미 발표된 연구에 의하면 상온에서 기체의 유동에 따른 Re수와 전도 파괴전압과의 관계는 전극간 거리 d=1.2[cm]에서 전압상승율은 다르나 낮은 Re 영역에서는 전압상승율이 크며, 그 이상에서는 완만한 후 거의 포화되는 경향이 나타났으며, 그 결과 유동시의 최대전도파괴전압은 정지시 보다 6.3[kV] 높게 나타났다 [8].

따라서 본 실험에서는 위 실험을 기초로 하여 각 전극간 거리 d 를 1.2 [Cm]로 두고, 온도(30.40.60.80 [°C])와 유속(1~16 [m/s])을 변화 시켜가면서 관측한 결과 전압상승율은 각 온도 및 d 에 따라 그 경향이 유사하게 나타나고 있다. (그림3의 a, b) 여기서는 그림3의 a) 경우, 즉 $d=1$ 일 경우를 중심으로 설명하여 보고자 한다.
저 Re 영역에서는 전압 상승율이 크며 중 Re 영역에서는 거의 완만한 후 고 Re 영역에서는 포화되는 경향이다.



a) $d = 1$ (Cm)



b) $d = 2$ (Cm)

Fig3. Sparkover discharge voltage versus Reynold number

저 Re 영역에서 전압상승율이 큰 것은 다음과 같이 설명 할 수 있다. 전도파괴는 Corona에 의하여 발생한 전하분포에 큰 영향을 받게 되는데, 이러한 저 Re 영역에서는 그림1과 같이 유속분포의 변화가 심한 영역으로 전하분포 또한 이에 준하여 큰 변화를 가져오게 된다 [6, 7]. 그 결과 방전도도 큰 변화를 가져오며 중 Re 영역을 거치고 Re 영역으로 갈수록 방전도의 변화는 점점 줄어든다. 중 Re 영역과 고 Re 영역의 경계 $Re_{in} = 6.87 \times 10^4$ 부터는 그림1의 B)와 C) 중간 형태의 방전도형을 계속 유지한다(OHP참조). 이렇게 방전도 모양이 같게 유지 된다는 것은 Vs가 포화된 결과로 나타난다.

이러한 상승관계를 더욱 명확히 하기 위해 $d=1$ [Cm], 유속 1 [m/s], 그리고 공기온도는 30 [°C]로 유지시킨 경우에 8.1 [kV]의 전압을 인가하여 방전을 지속시켜 놓고 Re만 변화시켜 갈 때 방전도 및 전압, 전류파형을 관찰한 결과 사진1과 같다.

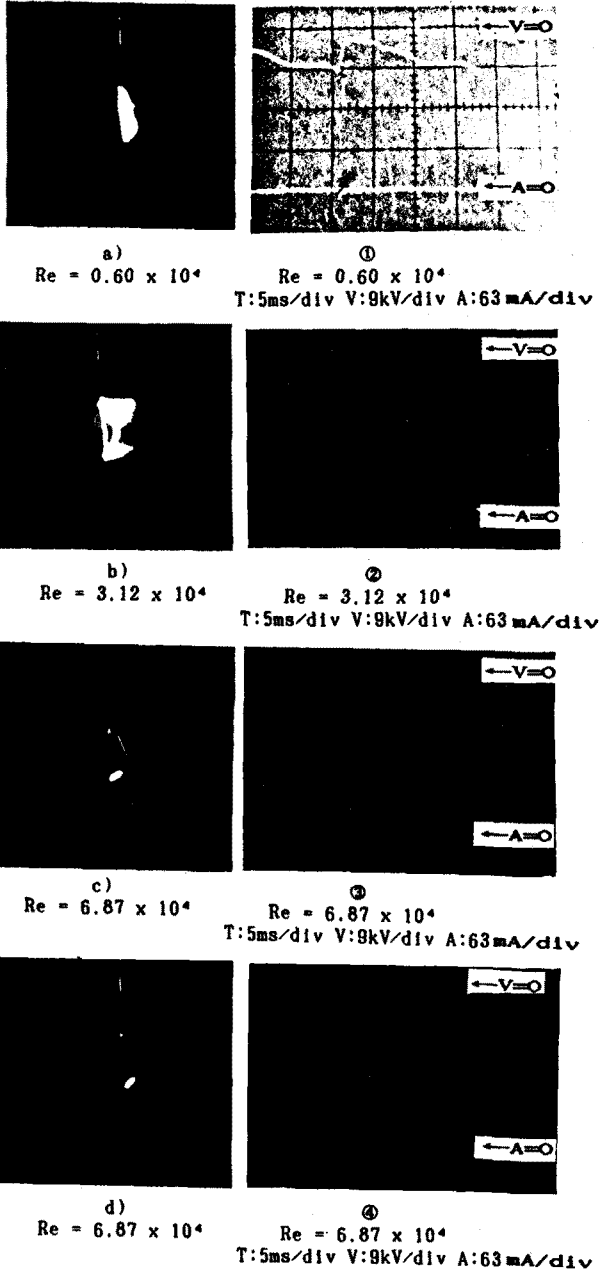


Photo 1. Discharge paths and current - voltage waveforms for constant input power

여기서 보면 저 Re에서는 사진 a), b)와 같이 방전도는 큰 변화를 가져오는데, 이것은 앞에서 서술한 바와 같고 중 Re와 고 Re경계인 $Re = 6.87 \times 10^4$ 에서는 사진 c), d)와 같이 전도파괴와 Corona가 교번하는데 이때의 전압, 전류파형도 사진1의 ㉠, ㉡와 같다. 고 Re에서는 d) 및 ㉢와 같이 Corona가 계속 유지 된다. 이것은 전기적 입력이 일정할때 流速이 증대되면

유체의 냉각손이 증대되어 Arc의 초당보유열량이 감소된 결과 소호작용이 증대된 결과이다 [5].
 그 결과 사진1의 ①, ②, ③ 및 ④와 같이 저Re에서는 전압, 전류파형이 큰 변화를 가져오고 중Re에서는 적은 변화를 가져오며, 고Re에서는 d) 및 ④와 같이 Corona가 계속 유지되는데 이것은 그림3의 a)에서 보는 바와 같이 고Re에서는 Vs가 포화되는 경향과 일치한다.

다음은 정지상태에서 온도변화에 따른 Vs상승관계에 관하여 검토하여 보기로 한다.
 이것은 다음(7)식을 이용하여 계산 하였는데

$$V_s = K (23.98 \rho d + 6.8 \sqrt{\rho d}) [kV] \dots (7)$$

여기서 ρ : 20 [°C] 의 공기에 대한 상대공기밀도
 $= 0.38 P / (T + 237)$
 P : 기압 [mmHg]
 T : 온도 [°C]
 d : gap 길이 [Cm]

이 식은 평동전계에서 Vs에 관한 식을 응용하여 여기에 불평동계수 K(0.324)를 곱한 식으로 본실험과 같은 불평동전계에서 사용 가능한 식으로 구성하였다. 그 결과 계산값과 실험값의 오차는 평균 1.18% 였다. 그림4는 각 온도에서 Re의 첫 구간인 $0 \sim 10^4$ 에 대한 Vs의 비율을 100 [%]로 하고, 이것에 대하여 구간간의 상승율의 비율을 [%] Vs / Re로 정의하여 그런 그림으로써, 그 특성은 그림과 같이 Re에 따라 점점 감소하는 특성을 갖는다. 이를 수식화 하면 (8)식과 같이 된다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A + B \epsilon^{c \cdot Re} \dots (8)$$

여기서 A, B, C'는 상수으로써 다음과 같다.
 A = 10.5
 B = 120
 C = -3.00×10^{-5}

이 식은 본 연구의 각 온도에 대한 유동시의 Vs 상승 관계를 대표하는 식으로 오차는 0.67 [%] 정도으로써, 원형 관내의 온도변화와 공기흐름에 따른 Vs의 상승율을 표시하는 식으로써 공학적으로 가치있는 식으로 사료 된다 [8]

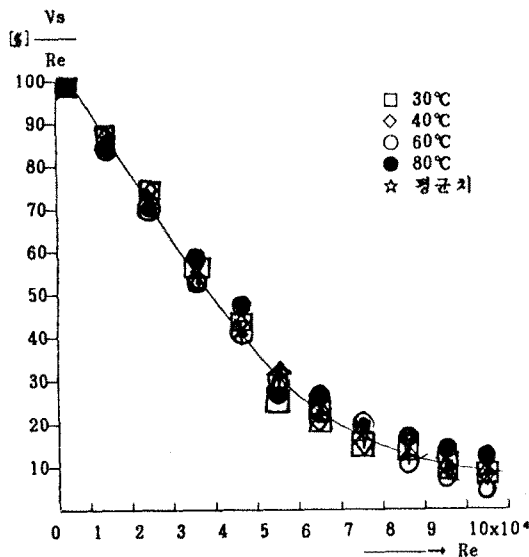


Fig 4. [%] $\frac{V_s}{Re}$ Versus Reynolds number

V. 결론

직원통관내에서 극간거리, 유속및 온도를 변화시켰을때 眞의 직류방전복성용 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전압상승율의 관계는 다음식으로 나타낼수 있다.

$$[\%] \frac{V_s}{Re} = A + B \epsilon^{c \cdot Re}$$

여기서 A, B, C는 상수써

A = 10.5
 B = 120
 C = -3.00×10^{-5}

2) Reynold수의 조정으로 기체의 방전형식 제어가 가능하다.

3) 정지시의 각온도에 따른 전로파괴전압 (Vs)는 다음식으로 표현이 가능하다.

$$V_s = K (23.98 \rho d + 6.8 \sqrt{\rho d}) [kV] \dots (7)$$

여기서 ρ : 20 [°C] 의 공기에 대한 상대공기밀도
 $= 0.38 P / (T + 237)$

P : 기압 [mmHg]
 T : 온도 [°C]
 d : gap 길이 [Cm]

위의 결과를 응용하여 기체방전 응용분야에 좋은 자료로 활용이 가능 하리라 사료된다.

參 考 文 獻

- 1) 原 雅 測 : 전기학회 논문집 55 - A24 昭和 55.
- 2) 平山直道 : 流體力學 (1973)
- 3) Theodore Allen Jr. et al : Fluid Mechanics 1972
- 4) Kwang-Sik Lee: Report of Institute of Industrial technology yeungnam university, Vol.12, No.1 pp 161 ~166 (1984)
- 5) Swanson, B.W, Rott, R.M, & Brown, T.E. : IEEE, Vol. PAS89, No.8, P.2033 (1970)
- 6) 原 雅 測 : 平等電界中에 設置된 物體의 이온흐름에 의한 帶電特性的의 測定, 電氣學會 論文誌, 55 - A 24, 昭和 55年
- 7) K.J. Nygaard : Frequency of Corona Discharge Trichel Pulses In Air Flows, Journal of Applied Physics, Vol 37 No.7, pp.2850-2852, 1966
- 8) Yeong - Hun Kim : Characteristics of Sparkover Discharge in Flowing Air with Reynold Numbers Variable, MS Thesis Graduate school of Y.N. University